

МИНИСТЕРСТВО КУЛЬТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ РЕСТАВРАЦИИ» (ФГБНИУ «ГОСНИИР»)

Художественное наследие.
Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.

Международное сетевое рецензируемое научное издание

№2 (18) 2026

МОСКВА 2026

THE MINISTRY OF CULTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION

THE STATE RESEARCH INSTITUTE FOR RESTORATION

Художественное наследие.
Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.

An international peer-reviewed online scientific journal

№2 (18) 2026

MOSCOW 2026

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Д. Б. Антонов

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

А. С. Макарова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**А. Н. Балаш, В. В. Баранов, С. И. Баранова, Г. И. Вздорнов, В. Г. Гагарин,
М. Ф. Дубровин, В. В. Игошев, С. С. Ипполитов, С. А. Кочкин, А. В. Кыласов,
Л. И. Лифшиц, Т. К. Мкртычев, А. В. Окороков, С. А. Писарева, И. Н. Проворова,
И. Г. Равич, Н. Л. Ребрикова, Н. В. Синявина, С. В. Филатов, Н. Е. Шафажинская,
О. В. Яхонт.**

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ:

О. Г. Кирьянова

РЕДАКТОР:

Г. И. Герасимова

Выходит 4 раза в год

Адрес редакции:

107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44 стр. 1

e-mail: journal@gosniir.ru

Сайт: <http://www.journal-gosniir.ru/>

Свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ. № ФС77-82901 ОТ 14.03.2022

ISSN 2782-5027

EDITOR-IN-CHIEF:

Dmitriy B. Antonov

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Anastasia S. Makarova

EDITORIAL BOARD:

**A.N. Balash, V.V. Baranov, S.I. Baranova, G.I. Vzdornov, V.G. Gagarin, M.F. Dubrovin,
V.V. Igoshev, S.S. Ippolitov, S.A. Kochkin, A.V. Kylasov, L.I. Lifshic, T.K. Mkrttychev,
A.V. Okorokov, S.A. Pisareva, I.N. Provorova, I.G. Ravich, N.L. Rebrikova, N.V. Sinyavina,
S.V. Filatov, N.E. Shafazhinskaya, O.V. Yahont.**

EXECUTIVE SECRETARY:

O.G. Kiryanova

EDITOR:

G.I. Gerasimova

Quarterly journal

Address:

44-1, Gastello St., Moscow, Russia, 107014

e-mail: journal@gosniir.ru

Web-site: <http://www.journal-gosniir.ru/>

Mass media registration certificate EL. N° FS77-82901 from 14.03.2022

ISSN 2782-5027

СОДЕРЖАНИЕ

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-7-26

Беккер А. О., Дубровин М. Ф.

Уточнения и дополнения к информации

о времени работы московских пробирных мастеров XIX века

7

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-27-36

Добровольский С. В., Глуховская Ю. И.

Возможности использования газодинамических способов

формирования материала для реставрации изделий из металла

27

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-37-58

Котельников П. Н., Кураков С. В., Макарова А. С., Самойлов В. Б.

Реставрация памятников из металла методом

холодного газодинамического напыления:

критерии применения и оценка результатов

37

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-59-65

Парфенов В. А.

Лазерная порошковая наплавка:

новое в реставрации памятников из металла

59

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-66-73

Плахов В. В., Каракуркчи Р. С., Хасиева Е. А.

Цвет, рожденный током: анодирование титана

как искусство и технология

66

CONTENTS

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-7-26

Bekker A. O., Dubrovin M. F.

Clarifications and additions to the information about the working periods of Moscow assay masters of the 19th century

7

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-27-36

Dobrovolsky S. V., Glukhovskaya Yu. I.

Possibilities of using gas-dynamic methods of material formation for the restoration of metal objects

27

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-37-58

Kotelnikov P. N., Kurakov S. V., Makarova A. S., Samoilov V. B.

Restoration of metal monuments using the cold gas-dynamic spraying method: application criteria and results assessment

37

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-59-65

Parfenov V. A.

Direct metal laser sintering: new in the restoration of metal monuments

59

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-66-73

Plakhov V. V., Karakurkchi R. S., Khasieva E. A.

Color born of amperage: anodizing titanium as art and technology

66

П. Н. Котельников, С. В. Кураков, А. С. Макарова, В. Б. Самойлов

РЕСТАВРАЦИЯ ПАМЯТНИКОВ ИЗ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ: КРИТЕРИИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением границ допустимости и эффективности современных технологий напыления для реставрации металлических произведений искусства, экспонирующихся под открытым небом. Работа представляет собой комплексный анализ метода холодного газодинамического напыления (ХГН), включая историю его разработки, технологические особенности и возможности данного способа, современные области применения. Объектами практического исследования выступили отреставрированные с применением ХГН памятники монументального искусства в Москве и Санкт-Петербурге. Детальному лабораторному изучению подверглись пробы покрытий, отобранные с объекта культурного наследия федерального значения — аллегорических скульптур из цинкового сплава «Вода» и «Земля» (В. И. Мухина, Н. Г. Зеленская, А. М. Сергеев). В ходе работы был проведен комплекс анализов, включая натурный визуальный осмотр, металлографию и электронную микроскопию, что позволило оценить текущее состояние покрытий, их адгезию, микроструктуру и выявить основные механизмы деградации. В результате исследования систематизированы ключевые достоинства и недостатки метода ХГН в реставрационной практике, а также разработаны практические рекомендации по его применению для сохранения монументальной металлической скульптуры. Полученные выводы имеют важное прикладное значение для выбора оптимальных технологий, проектирования реставрационных процессов и устранения повреждений объектов культурного наследия из металла в условиях агрессивной внешней среды. Показанная в статье работа проведена в рамках научной темы (рег. № НИОКТР 124031100828-6), выполнявшейся за счет средств федерального бюджета в 2025 году.

Ключевые слова: наплавление, холодное газодинамическое напыление, декоративно-защитное покрытие, реставрация металла, монументальная скульптура, уличная экспозиция, долговечность покрытий.

P. N. Kotelnikov, S. V. Kurakov, A. S. Makarova, V. B. Samoilov

RESTORATION OF METAL MONUMENTS USING THE COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING METHOD: APPLICATION CRITERIA AND RESULTS ASSESSMENT

This article addresses the determination of the applicability limits and efficacy of modern spraying technologies for the restoration of metal artworks exposed outdoors. The study presents a comprehensive analysis of the Cold Gas-Dynamic Spraying (CGDS) method, encompassing its development history, technological features, potential, and modern applications. The practical research is focused on the outdoor sculpture located in Moscow and Saint Petersburg that was restored using this cold spraying method. A detailed laboratory study was conducted on coating samples taken from the federally significant cultural heritage objects — the allegorical zinc-alloy sculptures “Water” and “Earth” (by V. I. Mukhina, N. G. Zelenskaya, A. M. Sergeev). A set of analyses, including on-site visual inspection, metallography, and electron microscopy, was performed to assess the current state of the studied coatings, their adhesion, microstructure, and to identify the primary degradation mechanisms. As a result, the key advantages and disadvantages of the CGDS method in restoration practice have been systematized, and practical recommendations for its application in preserving monumental metal sculpture have been developed. The findings are of significant applied value for selecting optimal technologies, designing restoration processes, and addressing damage to metal cultural heritage objects in aggressive outdoor environments. The article presents work carried out within the framework of a scientific topic (registration number NIOKTR 124031100828-6), implemented at the expense of the federal budget in 2025.

Keywords: fusing, cold gas-dynamic spraying, decorative-protective coating, metal restoration, monumental sculpture, outdoor exposure, coating durability.

Введение

Произведения монументальной скульптуры из черного металла и цветных сплавов, экспонирующиеся под открытым небом, находятся в нестабильной среде под воздействием агрессивных условий. Атмосферные осадки, ветровая эрозия, переменчивая температура, стационарное положение, техногенное влияние, биозагрязнения и другие факторы оказывают постоянное негативное воздействие на художественную поверхность и конструкцию памятника, приводя к развитию процессов коррозии, образованию трещин, разрывов и других дефектов металла. Всё это негативно сказывается на произведении монументальной скульптуры и в некоторых случаях может привести к необратимым последствиям, вплоть до утраты памятника. Минимизация воздействия агрессивной среды требует комплексного подхода, практически постоянного реставрационного вмешательства и значительных средств. В связи с этим поиск применяемых в реставрации защитных технологий которые могли бы минимизировать эти усилия, является актуальным и востребованным. В последние годы в реставрационную практику активно внедряется метод напыления, или наплавления, предполагающий нанесение на поверхность скульптуры тонкого слоя металла, который может служить защитно-декоративным покрытием [1].

Покрытиями называют искусственно созданные поверхностные слои, которые могут отличаться от материала основы химическим и фазовым составами, структурой и свойствами. Покрытия наносятся для защиты поверхности от различных видов воздействий (высоких нагрузок, температур, различных агрессивных сред), в декоративных целях, а также для восстановления нарушенной геометрии изделий. Материаловедение покрытий представляет собой большой раздел знаний об особом классе функциональных материалов. Условно все покрытия можно разделить на два вида по принципу взаимодействия с поверхностью:

- 1) изменение химического состава поверхности (химико-термическая обработка);
- 2) нанесение нового материала на поверхность (напыление, осаждение, наплавка, нанесение эмалей и лакокрасок) [18, с. 3–4].

В целях реставрации произведений из металла первый тип покрытий не используется, так как формирование диффузионных покрытий при химико-термической обработке приводит к структурным и фазовым превращениям в металлах и сплавах реставрируемого объекта, что совершенно недопустимо в части сохранения историко-культурной ценности, следов бытования, информации о технологии изготовления скульптуры. Второй тип покрытий, напротив, при соблюдении условий обратимости процесса, широко применяется в реставрации произведений из металла как многофакторный способ, несущий возможности консервации и защиты объекта от агрессивного воздействия окружающей среды, поддержания декоративно-художественного образа памятника без его изменения, восполнения утрат рельефа поверхности [17] и защитно-декоративного покрытия и т. п.

Существует широкая номенклатура покрытий по способу их нанесения на поверхность металлического объекта: химические, гальванические, лакокрасочные, эмалевые, наплавочные, вакуумно-плазменные [15] и прочие.

К современным и широко применяемым в промышленности и народном хозяйстве технологиям нанесения покрытий относится газотермический способ, при котором различными методами напыления (газопламенного, плазменного и детонационного) разогретые мельчайшие частицы разгоняются выходящим из сопла сжатым газом и направляются на покрываемую поверхность, где они формируют слой [10, с. 17].

Нужно отметить, что нанесение покрытий газотермическими способами носит необратимый характер, поэтому использование данных технологий должно иметь вескую аргументацию при проектировании и выполнении реставрационных работ, а также локальную область применения (например, в зоне коррозионных разрушений). Недопустимость применения газотермического напыления на всей поверхности памятника очевидна, так как приводит к нарушению оригинальной фактуры металла и изменению авторского замысла. Также при последующем удалении напылённого слоя (механических, химических, лазерных и др. расчистках) происходит повреждение художественной оболочки (поверхности, основания) объекта.

Сущность процессов газотермического нанесения покрытий заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала, обеспечивающего перенос их на поверхность обрабатываемого изделия и формирование слоя. Частицы могут представлять собой порошок, полученный расплавлением и газовым дроблением исходного материала — проволоки, стержней, пластифицированной массы [8] и т. д. [26]. Для разгона частиц применяют различные высокотемпературные газовые среды. Нагрев напыляемого материала проводят для повышения пластичности и адгезионной способности частиц [9]. Таким образом, главными определяющими показателями газотермического процесса напыления являются температура и скорость частиц наносимого покрытия.

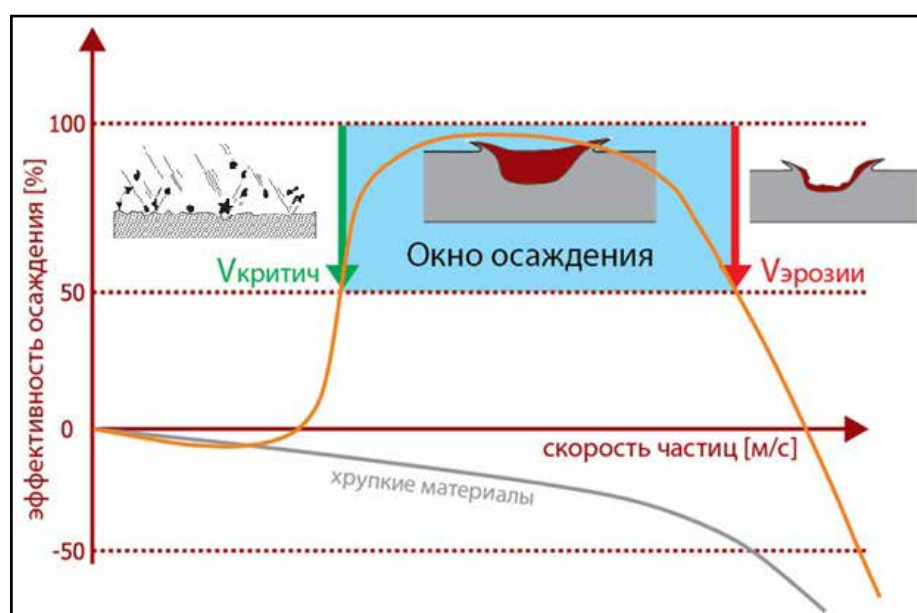
Основные показатели процесса холодного газодинамического напыления, технологические возможности способа

Наиболее низкотемпературным газотермическим способом нанесения покрытий является метод ХГН — холодного газодинамического напыления (в машиностроении нагрев поверхности до 800–1000°C без расплавления металла называется холодным). Применительно к реставрационной практике можно утверждать, что это самый щадящий процесс напыления с точки зрения нагрева поверхности реставрируемого объекта. При использовании ХГН вполне ожидаемо отсутствует коробление и тепловые деформации в конструкциях и элементах объекта технологического воздействия.

Явление формирования покрытий методом ХГН было исследовано в СССР в начале 1980-х годов. Группа ученых Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Академии наук СССР (сегодня — ИТПМ СО РАН) разработала способ нанесения металлических покрытий при помощи ускорения частиц до сверхзвуковых скоростей. Это привело к разработке двух патентов в СССР — изобретениям метода и устройства для ускорения

металлических частиц газом с высоким давлением при температурах, значительно меньших температуры плавления частиц, для формирования слоя с высокой адгезией к подложке [5]. Процесс называли холодным газодинамическим напылением, позволяющим напылять разнообразные материалы, — металлы, сплавы, полимеры и их смеси [7, с. 15]. В период с 1980 по 2020 г. выпущено в общей сложности более 150 патентов в области ХГН.

Суть способа ХГН можно кратко охарактеризовать следующим образом: «не расплавляем, а ускоряем» [11, с. 22–24]. Исследования, проведенные по схеме «разгоняемая в сопле сверхзвуковая гетерогенная струя — преграда для напыления», показали определяющую роль скорости частиц. Для металлических частиц с размером менее 50 мкм существуют критические скорости их взаимодействия с подложкой (500–600 м/с). При скорости меньше критической наблюдается процесс эрозии. Если скорость превышает критическое значение, происходит процесс напыления (ил. 1). Важно, что свойства получающихся покрытий (адгезия, пористость, микротвердость и т. д.) зависят от скорости напыляемых частиц [11, с. 36].



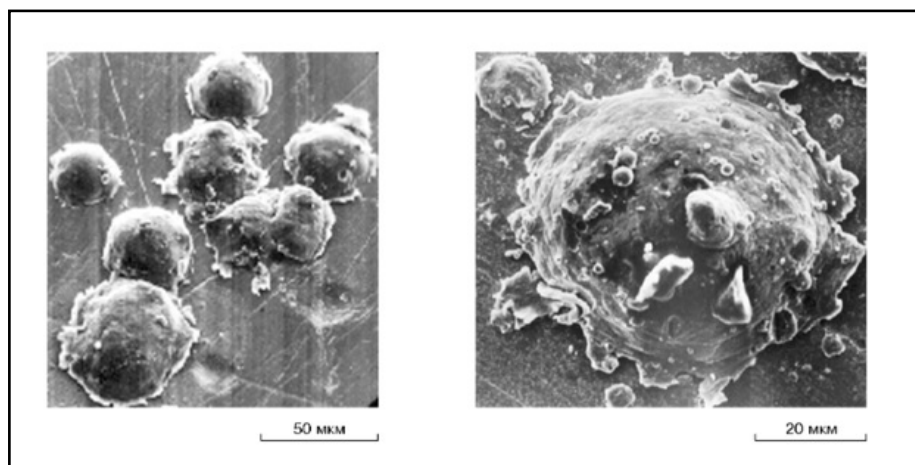
Ил. 1.
Виды ускорителей: 1 — угловой,
2 — для внутренних поверхностей.
Разработчик С. А. Борисов

Для метода ХГН была установлена следующая закономерность: формирование покрытия возможно, когда кинетическая энергия частицы превышает примерно $\frac{1}{3}$ величины тепловой энергии, соответствующей температуре плавления, независимо от материала частиц [6, с. 47].

Кроме того, анализ закрепившихся после удара на полированной подложке частиц, проведенный с помощью электронной и оптической микроскопии, позволил выявить характерные особенности их деформирования. В представленной микрофотографии частиц алюминия на поверхности меди видно, что на конечном этапе пластического деформирования на периферии контакта образуются коронобразные выбросы металла (ил. 2). Основную роль здесь играют процессы, протекающие вблизи контакта, где происходит интенсивная деформация и перекачка механической энергии в тепловую. В этих условиях в окрестности стенки при ударе может сформироваться тонкий расплавленный слой металла. Образование этого слоя зависит от баланса генерации и отвода тепла [3, с. 204].

Эксперименты и математическое моделирование показали, что при ударе мелкой металлической частицы о твердую недеформируемую преграду вблизи поверхности может формироваться тонкий слой расплавленного металла толщиной

$\delta < 0,015d$ (d — диаметр частицы), в котором температура близка к температуре плавления металла порошкового покрытия. Образованием такого слоя можно объяснить и само явление высокой адгезии частиц с подложкой при газодинамическом напылении [4, с. 112–116].



Ил. 2.

Характер деформации частиц алюминия при соударении их с полированной медной подложкой при методе ХГН. Источник: [15]

Приведенные фотографии закрепления отдельных частиц позволяют однозначно утверждать: воздействие метода ХГН на поверхность объекта имеет эрозийный характер. Это в реставрационной практике является недопустимым по отношению к авторской поверхности произведений из металла — как экспонирующихся на открытом воздухе, так и предметов интерьерного (музейного) хранения. Применение данного способа напыления покрытия возможно только для восстановления сплошности поверхности на локальных участках, где имеются раковины, каверны, разрывы, образовавшиеся вследствие коррозионных процессов, механических повреждений или дефектов производства. В любом случае речь идет о локализованном применении метода ХГН в местах разрушения и утрат произведений из металла, а не о полном, сплошном покрытии, так как данный способ напыления является необратимым, — удалить покрытие без ущерба для поверхности памятника не представляется возможным.

Метод ХГН в сравнении с другими технологиями газотермического напыления выглядит экономически обоснованным в промышленности и применимым в силу низких технологических затрат на освоение способа напыления, достаточно высокой адгезии при соблюдении технологических режимов изготовителем оборудования и сырья, низкого содержания оксидов и окислов в покрытии, безопасности и экологичности при соблюдении инструкций при работе с установкой ХГН. Данная технология хорошо себя зарекомендовала в ремонте, восстановлении и реновации машиностроительных узлов, заделке литейного брака, каверн и трещин в изношенных деталях инженерного оборудования.

Подбор режимов напыления при апробации однокомпонентного (частицы состоят из чистого металла — Cu, Zn, Al и проч. или из сплава металлов, раздробленного или гальванически восстановленного в мелкодисперсный порошок) состава частиц позволяют получать повторяемые и ожидаемые результаты метода ХГН.

Способ ХГН позволяет использовать для получения покрытий не только однокомпонентные порошки, но и их смеси (двух- и более компонентные). Поскольку эффективное напыление каждого материала происходит при определенных значениях температуры и скорости его частиц, эти значения могут сильно различаться для различных компонентов смеси (например, при смешивании алюминия с цинком или железом) [28, с. 780].

Таблица 1. Количественное соотношение фаз в покрытии Al-Zn

Температура и число циклов напыления	Содержание фаз, вес. %		
	Zn	Al	Al ₂ O ₃
T=270°C, N=7	38,7±2,5	41,8±0,8	19,5±1,2
T=540°C, N=3	61,7±2,8	19,4±0,8	18,9±0,8
T=540°C, N=7	61,6±3,0	18,5±0,7	19,9±1,3
T=540°C, N=7, термическая обработка	72,5±3,3	11,0±0,9	16,5±1,7

Ученые и инженеры лаборатории №6 ИТПМ СО РАН провели эксперимент по напылению трехкомпонентной смеси при разных температурах и скоростях частиц [25, с. 75–84]. В примере базовое соотношение частиц алюминия (Al), цинка (Zn) и оксида алюминия (Al₂O₃) равно 35±5%: 40±5%: 25±5%. Результаты исследования полученного покрытия (табл. 1) показали существенную разницу в химическом составе напылённого слоя.

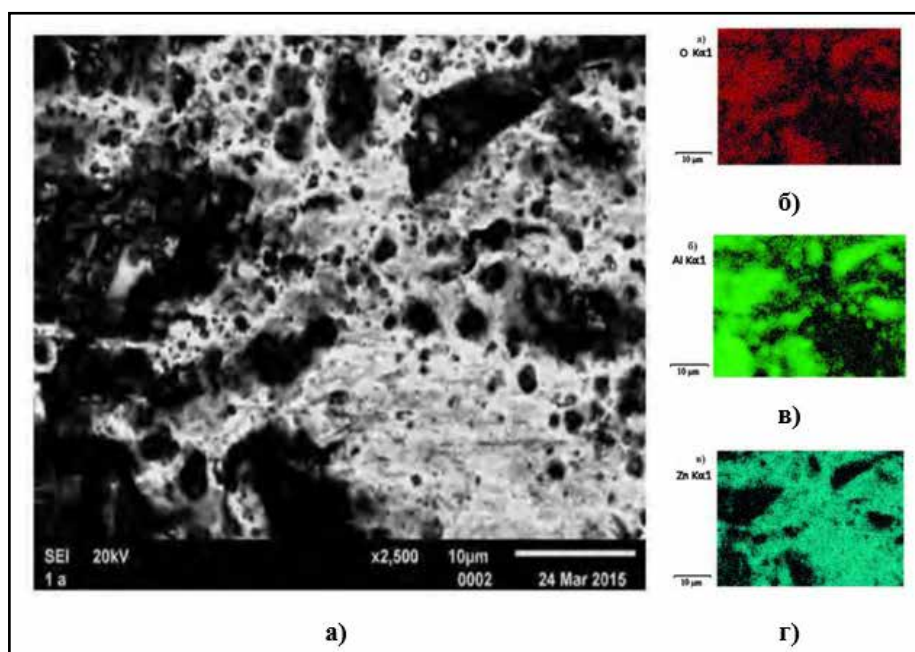
Кроме того, металлографические исследования и замеры твердости показали неравномерную величину микродеформаций частиц (табл. 2), что в целом приводит к возникновению остаточных напряжений [12, с. 24–25], приводящих к коррозионным процессам на границе зёрен и фазовых систем [23, с. 37–38; 24, с. 78–83], что в конечном итоге приведет к уменьшению адгезии напылённого слоя и его последующему разрушению.

Таблица 2. Величины микродеформаций кристаллических решеток различных фаз в покрытии Al-Zn

Температура и число циклов напыления	Величина микродеформаций, $\times 10^{-4}$		
	Zn	Al	Al ₂ O ₃
T=270°C, N=7	23,4±0,9	25,9±2,0	40,8±6,0
T=540°C, N=3	28,6±1,2	26,0±1,8	29,5±4,8
T=540°C, N=7	32,2±1,2	28,6±3,4	33,6±6,0
T=540°C, N=7, термическая обработка	39,6±2,7	60,8±4,9	21,7±6,6

Неравномерность в содержании фаз двухкомпонентного покрытия Al-Zn (ил. 3) приведет к неравновесному электрохимическому состоянию на поверхности произведений из металла, экспонирующихся на открытом воздухе, и создаст классические очаговые участки будущего коррозионного разрушения покрытия [20, с. 5–6], а высокий деформационный наклёп покрытия, полезный с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик изделия в машиностроении, может иметь нежелательный эффект в реставрационных практиках, обозначенный выше.

В 2010 г. учеными и инженерами лаборатории №6 ИТПМ СО РАН была разработана схема соплового узла [21; 22], позволяющего управлять температурой и скоростью напыляемых частиц не только варьированием параметров газового потока и вводимых компонентов смеси, но и независимой инжекцией этих компонентов в разные области потока для достижения их оптимального напыления.



Ил. 3.

Пример неравномерности в содержании фаз двухкомпонентного покрытия методом ХГН: а) структура двухкомпонентного покрытия Al-Zn; б), в), г) электронная поэлементная (O, Al, Zn — соответственно). Источник: [24]

Широкий спектр применяемых материалов для метода ХГН не является показателем разнообразия мелкодисперсных порошков в производстве сырья для реставрационных целей. Получение различных по химическому составу однокомпонентных покрытий для покрытий методом ХГН затруднительно и нерентабельно в силу широкого диапазона черных и цветных сплавов, применяемых в изготовлении произведений из металла, а подбор из уже существующих однокомпонентных композиций требует научных исследований и испытаний для обоснования применения данного состава покрытия и последующей оценки качества реставрационных работ.

Выход из вышеуказанной ситуации становится возможен при напылении двухкомпонентного покрытия (из двух видов порошковых частиц разных металлов, например, Al и Zn), создающих металлическую композицию, близкую к химическому составу основного материала произведений из металла, экспонирующихся на открытом воздухе. Для этого необходимы более дорогостоящая установка для метода ХГН, имеющая два, а не один, порошковых питателя (для разных видов металлических частиц); более квалифицированный персонал (оператор по нанесению двухкомпонентного покрытия); проведение тестовых испытаний и подбор режимов напыления, что в целом приводит к значительному удорожанию технологии ХГН.

История внедрения метода ХГН в реставрационную практику

Если специалисты Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН были первооткрывателями данного способа, то реализация технологии метода ХГН исторически была возложена на Обнинский центр порошкового напыления (ООО «ОЦПН»), который был основан в 1996 г. группой специалистов с целью создания оборудования для нанесения металлических покрытий новым методом.

В 1997 г. ООО «ОЦПН» осуществило первые поставки опытных образцов оборудования ДИМЕТ® («динамическая металлизация») потребителям. С 1998 г. начался серийный выпуск портативных моделей оборудования, которые нашли широкое применение в различных областях промышленности. Порошковые расходные

материалы для металлизации методом ХГН в России также выпускаются ООО «ОЦПН», однако серийный ассортимент их невелик, на сегодняшний день насчитывается около 15 марок для технологии ДИМЕТ. Это объясняется экономическим фактором — освоение выпуска новых порошковых смесей достаточно энергоёмко и затратно, не имеет массового спроса у конечного потребителя.

В реставрации произведений из металла применение однокомпонентных порошковых материалов позволило получить достаточно стойкое и однородное по свойствам покрытие.

Необходимо отметить, что технология ХГН предлагается к использованию в реставрации вскоре после начала серийного выпуска оборудования (в 2002 г., при начале промышленного выпуска оборудования в 1998 г.). Обращает на себя внимание и то, что технология ХГН внедряется в реставрационную практику сразу на примере выдающихся произведений отечественной культуры.

Способ холодного газодинамического напыления с использованием оборудования ДИМЕТ в реставрации монументальной скульптуры был впервые применен в г. Санкт-Петербурге с привлечением С. М. Бондаренко в 2002 г. Следует отметить, что к настоящему моменту он не значится в реестре аттестованных специалистов в области сохранения объектов культурного наследия, размещенном на сайте Министерства культуры Российской Федерации. Это хоть и косвенно, но всё же ставит под сомнение уровень его квалификации, тем более что апробация метода произошла сразу на двух выдающихся произведениях: скульптурах ангелов Исаакиевского собора и скульптуре ангела на шпиге Петропавловского собора Петропавловской крепости. Так, скульптурное убранство фасадов Исаакиевского собора датируется 2-й половиной XIX в. Скульптуры, украшающие наружный аттик, которые, вероятно, и были отреставрированы методом ХГН, выполнены выдающимся скульптором И. П. Витали. Скульптура на шпиге Петропавловского собора считается одним из главных символов Санкт-Петербурга и также датируется 2-й половиной XIX в. При этом, согласно общепринятым представлениям об этических нормах и принципах в реставрации, апробация методик невозможна на оригинальных произведениях искусства, тем более имеющих выдающееся значение для отечественной истории и культуры, и должна производиться на модельных образцах.

Согласно информации, размещенной на сайте фирмы-производителя, на скульптурах, украшающих Исаакиевский собор, напылением восстанавливалось гальваническое медное покрытие на свинцово-оловянных элементах медной скульптуры. Смесью свинца и олова заравнивались трещины, каверны, углубления и сквозные отверстия, восполнялись утраты. Такие же повреждения восстанавливались напылением медного порошка и на медной поверхности скульптур.

На скульптуре с креста шпиге Петропавловского собора Петропавловской крепости напылением медного порошка восстанавливалось гальваническое (или наклепанное) медное покрытие латунных вставок и места пайки этих элементов, а также устранялись повреждения, описанные в первом случае: смесью олова и свинца покрывались места пайки и сквозные отверстия. Напыление цинком производилось и на детали металлического поворотного механизма скульптуры.

Основное распространение метод ХГН в реставрации монументальных произведений из металла получил в г. Санкт-Петербурге. Примеров его использования в г. Москве или других регионах значительно меньше. Так, помимо двух уже

рассмотренных случаев известно о локальном применении метода ХГН в практике ООО «Реставрационная Мастерская «Наследие» при проведении работ по сохранению 6 объектов культурного наследия, расположенных в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Среди них — Памятник императору Николаю I на Исаакиевской площади, скульптуры львов на Адмиралтейской набережной и др.

Пожалуй, самый яркий пример использования метода ХГН при реставрации монументальной композиции, расположенной на территории г. Москвы, — это две аллегорических скульптуры «Вода» («Дары воды», «Море») и «Земля» («Дары земли»), установленные на аллее Олимпийского комплекса в Лужниках (Лужнецкая набережная). В 2008–2010 гг. при проведении реставрационных работ, связанных с восстановлением утраченных фрагментов и нанесением защитно-декоративного покрытия, необдуманно применили метод ХГН, что привело к дальнейшим разрушениям памятника. В 2015–2017 гг. проводились комплексные реставрационные мероприятия, в ходе которых были удалены покрытия ХГН и доделки. Удалось избежать искажения авторской фактуры на скульптурах благодаря тому, что напыление производилось без тщательной подготовки поверхности. В этом случае также стоит отметить, что новый неапробированный метод ХГН был применен в реставрации выдающихся произведений искусства. Автором эскизов монументов является народный художник СССР В. И. Мухина. История создания монументов не проста. В конце 1930-х гг. В. И. Мухина по просьбе архитектора А. В. Щусева создала эскизы четырех композиций, разместить которые предполагалось у сооружаемого Москворецкого моста. Среди эскизов, помимо однофигурных композиций «Вода» и «Земля», были представлены также двухфигурные композиции «Плодородие» и «Хлеб». Однако работа прервалась, и скульптуры созданы не были. В записке-завещании, адресованной и переданной сыном после смерти В. И. Мухиной В. М. Молотову, содержалась в том числе просьба увеличить скульптуры и установить их парами. Завещание скульптора было выполнено, и в 1964 г. скульптуры в существующих ныне размерах были отлиты из сплава на основе цинка бригадой мастера-литейщика, художника В. В. Лукьянова (как гласит надпись на плинтах скульптур) и установлены в Лужниках учениками В. И. Мухиной: З. Г. Ивановой, Н. Г. Зеленской, А. М. Сергеевым. Скульптура «Земля» представляет собой фигуру сидящей обнаженной женщины, которая двумя руками придерживает корзину с овощами и фруктами. Скульптура «Вода» представляет собой обнаженного юношу, который за ус удерживает большого сома, а у его ног изображен краб. Обе скульптуры решены в традициях соцреализма и представляют собой аллегории богатства природных ресурсов и мощь человека, укрощающего и подчиняющего стихии. Памятники являются яркой составляющей архитектурного комплекса стадиона Лужники.

Таким образом, применение метода ХГН в реставрации в настоящий момент получило ограниченное распространение, а реализованные проекты по большей части локализуются в г. Санкт-Петербург. Все известные авторам исследования и примеры связаны с использованием оборудования ДИМЕТ, производимого на базе ООО «ОЦПН».

Исследование образцов покрытия металла скульптур «Земля» и «Вода» В. И. Мухиной

Скульптурные композиции «Земля» и «Вода» неоднократно обследовались за последние 30 лет: производились обмеры памятников, фотофиксация, анализ

причин и характера разрушения. Реставрационные работы также выполнялись многократно: в 1995, 2001, 2008, 2010, 2015–2017 гг. Следует отметить, что интересующие нас операции были проведены с сентября по ноябрь 2010 г. и включали:

- нанесение двухслойного покрытия: газодинамическое напыление цинково-алюминиевого порошка марки А-20-11В, графитовая краска АГЗ-Х;
- восполнение утрат путём наращивания металла по гипсовым доделкам методом газодинамического напыления цинково-алюминиевого порошка марки А-20-11.

Материал обеих скульптур — сплав на основе цинка (цинк, алюминий, медь). Композиции выполнены методом литья. Структурный анализ и кристаллографические исследования, проведенные сотрудниками ГОСНИИР в 2010 и 2015 гг., показали, что наиболее близким к металлу скульптур и соответствующим по механическим свойствам современным сплавом является ЦАМ-9-1,5 ГОСТ 7117-62, состоящий из цинковой основы, не более 10% Al и 1–2% меди.

Металлографическое исследование 2015 г., выполненное И. Г. Равич — кандидатом технических наук, ведущим научным сотрудником ФГБНИУ «ГОСНИИР», — выявило микроструктуру, типичную для литых сплавов тройной системы цинк-алюминий-медь, содержащих несколько процентов алюминия и меди [19, с. 254, 247–248, табл. 65]. Межкристаллитных трещин, связанных с межкристаллитной коррозией, или иных проявлений коррозионного разрушения не обнаружено. Было определено, что хрупкость фрагментов скульптур связана с естественным старением, характерным для сплавов системы цинк-алюминий-медь. Этот процесс особенно выражен при выдержке сплава при температуре 0°C и ниже, т. е. в условиях, характерных для скульптуры, экспонирующейся под открытым небом.

Материалом для данного этапа процесса исследований стали пробы, отобранные с поверхности скульптур «Вода» и «Земля» в 2015 г. Они представляли собой небольшие фрагменты металла скульптур (ил. 4) с нанесенным методом ХГН покрытием и созданным в ходе реставрационных работ 2010 г. лакокрасочным слоем.



Ил. 4.

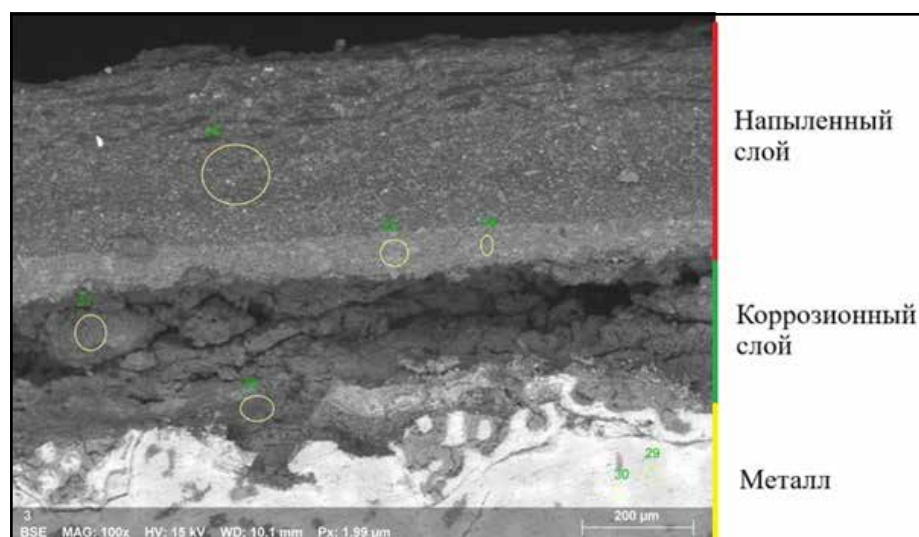
Подготовленные образцы для исследований с нанесенным покрытием методом ХГН: а) на основной металл скульптуры и доделку из нового металла, б) новая вставка. Фото авторов

В ходе подготовки к лабораторным анализам было обнаружено самопроизвольное осыпание материала покрытия в процессе хранения образцов, его непрочность, нестойкость и хрупкость при абразивной подготовке шлифа. Данный факт сделал бессмысленным проведение исследования по микротвердости поверхности

образцов, так как стала очевидной потеря адгезионных характеристик. Невооруженным глазом была видна белёсость и высолы между основным металлом и напыленным материалом, что говорит о коррозионном процессе, проходящем по границе сред «покрытие — основной металл».

В ходе проведения электронной микроскопии было получено подтверждение коррозионного растрескивания слоя, нанесенного методом ХГН и, как следствие, разрушение и деградация этого материала, отслаивание лакокрасочного покрытия и дальнейшее коррозионное разрушение металла скульптур.

На представленном результате микрорентгеновского спектроскопического исследования поверхности шлифа, изготовленного из фрагмента скульптуры «Земля-Вода», BSE-изображение (*Backscattered Electron image* — снимок в обратно рассеянных электронах) разделено на три основные части: металл (основа), коррозионный слой, напыление (ил. 5). Важно отметить, что на полученном снимке хорошо продемонстрировано отсутствие адгезии между металлической поверхностью и напылённым слоем в силу формирования рыхлых продуктов коррозии.



Ил. 5.
Характер расслоения поверхности
образца новой вставки. Фото авторов

Нанесенное покрытие состоит из двух слоев с разным химическим составом, обусловленным различной температурой и скоростью напыления. Анализируя характер покрытия по химическому составу, можно заметить существенное отличие материала его слоев от основного металла (более, чем в два-три раза по Al и Zn). Это абсолютно ожидаемо [13] в двухкомпонентных порошках с различным весом частиц, нанесенных обычным соплом, в котором скорость общего газодинамического потока регулируется только температурой.

При комплексном исследовании распределения химических элементов (BSE-анализ) в поверхностном слое были обнаружены неравномерное содержание фаз системы Zn-Al и высокая коррозионная активность (определяется неметаллическими химическими элементами O, Cl, S, P). Визуально эти два показателя полностью совпадают, что говорит об электрохимическом характере коррозии, где неравновесное содержание металлических элементов в разделе сред «покрытие — металл» может приводить к значительному увеличению скорости протекания реакций окисления, свойственных для коррозионных электрохимических процессов, являющихся главными факторами, уменьшающими адгезию покрытия к основному металлу скульптуры (ил. 6).



Ил. 6.

На исследованном фрагменте скульптуры «Вода» в 2016 году виден прогрессирующий рост трещин, расширение разломов и площади повреждения покрытия методом ХГН. Фото авторов

При более высоком разрешении, применяемом в кристаллографических исследованиях на шлифах в покрытии, выполненном методом ХГН, были обнаружены протяженные трещины, — как горизонтального, расслаивающего характера, так и вертикальные, перпендикулярные к поверхности шлифа, что наводит на мысль о существенном влиянии остаточных напряжений, возникающих по границам сред и зон напыления в методе ХГН при деформации частиц. Этот вопрос малоизучен и, как правило, его относят к нарушению технологии при нанесении покрытий методом ХГН. Однако, как показывает опыт специалистов ГОСНИИР, данный процесс негативно влияет на прочность и коррозионную стабильность художественных произведений, изначально изготовленных из пластичных металлов, но имеющих остаточные напряжения по границам зёрен металла, например, в ходе неправильного, неравномерного отжига [29].

Учитывая характер покрытия, полученного методом ХГН, а также результаты кристаллографических и электронно-рентгеноскопических анализов, можно сделать вывод о типе разрушения покрытия и отнести его к коррозионному растрескиванию под напряжением [31].

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) — это разрушение материалов (обычно металлов) под одновременным воздействием растягивающего напряжения и коррозионной среды. Оно приводит к образованию трещин, которые могут распространяться и вызывать внезапный отказ, при этом почти отсутствует видимая пластическая деформация [14]. Для возникновения этого явления необходимы три условия: восприимчивый материал, растягивающее напряжение и агрессивная среда, например, содержащая хлориды или сероводород.

Натурное визуальное обследование нескольких памятников, отреставрированных с помощью метода ХГН

В рамках настоящего исследования было выполнено натурное визуальное обследование нескольких объектов, при реставрации которых использовался метод ХГН.

Первый из них — скульптуры «Укрощение коней» работы П. К. Клодта, установленные на Аничковом мосту в г. Санкт-Петербурге. Скульптуры представляют

собой четыре бронзовые композиции, изображающие этапы покорения человеком дикой лошади и символизирующие победу разума над стихией. Вновь нужно отметить, что эти памятники, изготовленные в 1841–1850 гг., являются своеобразной «визитной карточкой» города и выдающимися произведениями искусства.

Скульптуры Аничкова моста прошли несколько крупных реставраций. Особенно значимая состоялась в 2000–2001 гг. и включала демонтаж скульптур на период в 10 месяцев. За это время была реализована внушительная программа работ, в том числе по восстановлению бронзы скульптур и защите от коррозии с применением метода ХГН. Кроме того, проводилось укрепление самого моста и его перил, были изготовлены точные копии деталей ограждения, что позволило сохранить этот символ Санкт-Петербурга.

Спустя 25 лет с момента завершения этой масштабной реставрации был выполнен натурный визуальный анализ памятников, с особым акцентом на результаты использования метода ХГН.

Переходя к анализу результатов натурального обследования, рассмотрим дефекты, выявленные визуальным осмотром на скульптурах Аничкова моста (ил. 7):

- наблюдаются изменение авторской фактуры и микрорельефа по всей поверхности памятника, произошло сглаживание поверхности, рельеф приобрел «обобщенный» вид: напылённый слой имеет визуально отличимую фактуру;
- на некоторых участках поверхности произошло частичное разрушение покрытия, нанесенного методом ХГН:
- грудь юноши — остатки покрытия ХГН с гладкой поверхностью; спина юноши — покрытие частично сошло, обнажается шершавая поврежденная поверхность (ил. 7 а);
- голень юноши — истонченное покрытие ХГН, обнажается шершавая поврежденная поверхность (ил. 7 в);
- бок лошади — истонченное покрытие ХГН, обнажается шершавая поврежденная поверхность (ил. 7 г);
- в узких или глубоких местах рельефа, например, в глубоких трещинах, заметны дефекты. Вероятно, напыляемый материал не смог должным образом проникнуть в сложные места на поверхности скульптуры. Для устранения таких дефектов методом ХГН потребовалась бы дополнительная механическая обработка (расширение дефекта), что само по себе может рассматриваться как нежелательное вмешательство в структуру памятника (ил. 7 е);
- на обнажившихся в результате утраты напылённого слоя поверхностях видны следы коррозии медного сплава ярко-зеленого цвета (ил. 7 б, 7 д, 7 е, 7 з).

Таким образом, в результате натурального визуального обследования нескольких памятников выявлены негативные и позитивные результаты использования метода ХГН в реставрации металлической монументальной скульптуры. Метод ХГН, как в целом любой из реставрационных методов, имеет свои достоинства и недостатки и требует взвешенного подхода при использовании.



а)



б)



в)



г)



д)



е)



ж)



з)

Ил. 7.
Фотографии скульптурной группы с покрытием, нанесенным методом ХГН, при визуальном осмотре.
Фото авторов

Рекомендации по использованию метода ХГН в реставрации произведений из металла, экспонирующихся на открытом воздухе

В данной статье рассмотрены примеры использования холодного газодинамического напыления в процессе реставрации произведений из металла, экспонирующихся на открытом воздухе. Метод ХГН, как и любой другой, имеет свои плюсы и минусы, и не является панацеей [2].

На основе проведенных исследований были выявлены следующие недостатки и ограничения метода ХГН в реставрации произведений из металла на открытом воздухе:

- изначально разработанный для нужд машиностроения и ремонта, метод не может быть в полной мере адаптирован к реставрационным нуждам. Методы ремонта и реновации механизмов не должны слепо переноситься на восполнение утрат/дефектов в памятниках историко-культурного наследия (независимо от их юридического статуса). Восполнение утрат в машиностроении не тождественно восполнению утрат на объектах, имеющих художественную и историческую ценность;

- метод ХГН является необратимым технологическим процессом. Для закрепления частиц напыляемого слоя на поверхности основного металла необходимо эрозионное воздействие. Только внедрение в материал основы обеспечивает создание механической связи и получение высоких адгезионных характеристик. В результате этого процесса происходит необратимое изменение авторской основы — как при подготовке поверхности (зачистке от коррозии и других наслоений), так и при нанесении слоя методом ХГН;

- зачастую поверхности памятника из металла разнообразны, имеют разную фактуру, которая воплощает художественный замысел автора. С утратой, искажением авторской фактуры происходит частичная потеря художественных достоинств памятника [16], поэтому данный метод не может применяться в качестве общего защитного-декоративного покрытия при реставрации;

- при локальном напылении для восполнения дефектов и утрат (каверны, раковины, разрывы и т. п.), возникших вследствие коррозии или в процессе изготовления памятника, также требуется тщательная подготовка поверхности металла: удаление окислов, коррозионных наслоений, полная химическая и механическая расчистка, удаление аварийного металла. При разной высоте рельефа раковины возникает необходимость выравнивания, что приводит к увеличению площади обработки и частичной утрате авторской поверхности;

- напылённый слой, как правило, имеет нагартованность (наклёп), растрескивание по вертикали и горизонтали, что приводит к преждевременным коррозионным процессам и дальнейшему разрушению памятника;

- напыление двухкомпонентного (и более) состава порошкового покрытия должно максимально соответствовать физическим характеристикам сплава производства из металла;

- напыление смешанного двухкомпонентного (и более) состава порошкового покрытия обычным соплом ДИМЕТ (установки I рода) невозможно из-за неравномерности и неопределенности состава покрытия в зависимости от режимов напыления. Получаемый напылённый слой не соответствует заявленному;

- надежное напыление двухкомпонентного состава порошкового покрытия возможно только с применением модернизированного сопла (установки II рода) при разделении двух фракций разных порошковых материалов на различные зоны внедрения в общий газодинамический поток для придания частицам фракций разной скорости напыления;

- нанесенное покрытие имеет остаточное напряженное состояние, что требует термического отжига поверхности покрытия и постоянного мониторинга за коррозионным состоянием границы раздела сред «покрытие — основной металл», что является высокочеловеческим метрологическим мероприятием;

С учетом отмеченных недостатков применение метода ХГН в реставрации произведений из металла на открытом воздухе следует ограничить следующими областями:

- возможно только локальное применение при восполнении дефектов и утрат (каверны, раковины, разрывы и т. п.), возникших вследствие коррозии или в процессе изготовления памятника, однокомпонентным порошком, близким по составу к основному металлу;

- возможно использование на вспомогательных конструкциях и неответственных участках поверхности;

- как промышленный и реновационный способ восстановления свойств и геометрии поверхности изношенных деталей метод ХГН может применяться в реставрации предметов политехнического типа [30] — в сменных и заменяемых узлах, с учетом обратимости реставрационного процесса для музейного объекта;

Заключение

В процессе данной работы было предпринято всестороннее изучение технологии холодного газодинамического напыления (наплавления) для определения границ допустимости ее использования в реставрации произведений из металла, экспонирующихся под открытым небом.

В исследовании рассмотрены особенности метода напыления (наплавления), история его разработки и области применения. На примере произведений из металла, отреставрированных в г. Москве и г. Санкт-Петербурге методом ХГН, проанализированы результаты его использования в реставрационных целях. Для этого выполнена оценка текущего состояния покрытий на нескольких отреставрированных произведениях путем натурного визуального анализа, а также проведены лабораторные анализы имеющихся в распоряжении ФГБНИУ «ГОСНИИР» проб однокомпонентных и двухкомпонентных покрытий, нанесенных на объект культурного наследия федерального значения «Аллегорические скульптуры "Земля" и "Вода"». На основе проведенных лабораторных исследований сделаны выводы о стойкости напыленного покрытия и о причинах его разрушения.

В результате проведенного исследования авторский коллектив выделяет существенные негативные последствия применения данного метода, — такие как повреждение авторской фактуры, необратимость и недолговечность покрытия, — и считает недопустимым его использование в качестве общего защитного-декоративного покрытия при реставрации. При этом отмечается возможность локального применения ХГН при восполнении дефектов и утрат на поверхности скульптуры (каверн, раковин, разрывов и т. п.). Таким образом, несмотря на широкое применение метода ХГН в промышленности, он не может быть в полной мере адаптирован к реставрационным нуждам.

Список литературы

1. III Профильная выставка «ПРОреставрацию. Импортозамещение в реставрационных материалах и технологиях» // Круглый стол ««Применение современных технологических процессов в научной реставрации» 30 ноября 2024 г. — URL: <https://yandex.ru/video/preview/8309309475587807700> (дата обращения: 24.12.2025).
2. IV Профильная выставка «ПРОреставрацию. Импортозамещение в реставрационных материалах и технологиях» // Научно-методический семинар «Современные возможности технологий (наплавления) в реставрации произведений из металла» 05 декабря 2025 г. — URL: <https://прореставрацию.рф/25/day2#!/tab/1514283531-2> (дата обращения: 24.12.2025).
3. Алхимов А. П. и др. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду / А. П. Алхимов, А. И. Гулидов, В. Ф. Косарев, Н. И. Нестерович // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. №1 (239). С. 204–209.
4. Алхимов А. П. и др. Холодное газодинамическое напыление: Теория и практика / А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, В. М. Фомин / под ред. В. М. Фомина. М.: Физматлит, 2010. — 536 с.
5. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Метод «холодного» газодинамического напыления // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 315. С. 1062–1065.
6. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. и др. Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1992. — 200 с.
7. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Плохов А. В. Научные основы технологии холодного газодинамического напыления (ХГН) и свойства напыленных материалов. Новосибирск: НГТУ, 2006. — 279 с.
8. Базанчук Г. А., Кураков С. В., Котельников П. Н. Применение аддитивных технологий в реставрации предметов политехнического типа с периодическим зубчатым профилем // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2024. №1. С. 7–28.
9. Зайцев А. Н., Александрова Ю. П., Ягопольский А. Г. Обзор методов оценки прочности сцепления газотермических покрытий // Изв. высших учеб. заведений. Машиностроение. 2021. №5 (734). С. 48–59.
10. Коробов Ю. С., Панов В. И., Разиков Н. М. Основные методы и материалы газотермического напыления. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 80 с. (Анализ свойств газотермических покрытий: Учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1).
11. Косарев В. Ф. Физические основы холодного газодинамического напыления: специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»: дис. ... д. ф.-м. н. Новосибирск: [Б. и.], 2003. — 292 с.
12. Косарев В. Ф. и др. Свойства медных и алюминиевых покрытий, полученных детонационным и холодным напылением / В. Ф. Косарев, А. А. Сова, С. Б. Злобин, В. Ю. Ульяницкий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. №6 (78). С. 20–26.
13. Косарев В. Ф., Клинков С. В. Кинетика формирования ХГН покрытий // XXIII семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям: сб. трудов

(с международным участием). Томск, 26–28 июня 2012 г.: Сб. трудов / под ред. Г. В. Кузнецова и др. Томск: ИТПУ 2012. С. 210–213.

14. Котельников П. Н. и др. Исследование причин разрушения литых латунных осветительных приборов, датируемых концом XIX – началом XX века / П. Н. Котельников, А. В. Михайлова, М. В. Нацкий, И. Г. Равич // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2025. №3 (15). С. 32–47.

15. Котельников П. Н., Кураков С. В., Богданов А. В. Научная реставрация предметов из металла с рельефным изображением: современные методы восполнения утрат // Невская фотоника-2025. Всероссийская науч. конф. с международным участием. Сб. науч. трудов (13–18 октября 2025 г.) СПб.: Ун-т ИТМО, 2025. С. 34.

16. Круглый стол «Theatrum Machinarum: Цифровые коммеморативные практики» 27 ноября 2025 // XXV международная научно-теоретическая конференция «Профессиональная культура специалиста будущего». 27–29 ноября 2025, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — URL: <https://pcsf.spbstu.ru/> (дата обращения: 24.12.2025).

17. Кураков С. В. и др. Современные подходы и возможности в научной реставрации чеканно-рельефного профиля произведений из металла / С. В. Кураков, А. В. Богданов, М. А. Мельникова, Г. В. Тихомиров, П. Н. Котельников // Дизайн. Материалы. Технология. 2025. №4 (80). С. 22–30. DOI: 10.46418/1990-8997_2025_4(80)_22_30.

18. Лобанов М. Л. и др. Защитные покрытия: Учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. — 200 с.

19. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов (С прил. Атласа макро- и микроструктур). — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1970. — 368 с.

20. Нацкий М. В., И. Г. Равич. Изучение причин самопроизвольного растрескивания музейных экспонатов, полученных обработкой давлением из латунных листов // Культурологический журнал. 2021. №4 (46). С. 1–10.

21. Патент № 2353705 С2 Российская Федерация, МПК С23С 24/04, В05В 7/06. Способ газодинамического напыления порошковых материалов и устройство для его реализации: № 2006141982/02: заявл. 27.11.2006: опубл. 27.04.2009 / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, С. В. Клинов [и др.]; заявитель Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ИТПМ СО РАН).

22. Патент № 2396371 С2 Российская Федерация, МПК С23С 24/04, В05В 7/10. Способ газодинамического напыления порошковых материалов и устройство для его реализации (Варианты): № 2008128115/02: заявл. 09.07.2008: опубл. 10.08.2010 / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, С. В. Клинов [и др.]; заявитель Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ИТПМ СО РАН).

23. Равич И. Г. О возможности применения отжига при реставрации изделий, полученных из листовой латуни и подвергшихся растрескиванию // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2022. №3. С. 35–44.

24. Равич И. Г. и др. О возможности отжига для снятия внутренних напряжений в изделиях с позолотой, изготовленных из листовой латуни с помощью деформации / И. Г. Равич, М. В. Нацкий, А. В. Михайлова, А. О. Беккер // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2023. №3. С.75–87.

25. Сова А. А. Исследование процесса нанесения многокомпонентных покрытий методом холодного газодинамического напыления: специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»: дис. ... к. т. н. Новосибирск, 2009. — 120 с.

26. Фазлуллин С. М. Проблема изучения и сохранения предметов музейных коллекций из полимерных материалов. Часть 1 // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2025. №1 (13). С. 73–87.

27. Шемаханская М. С. Металлы и вещи. История. Свойства. Разрушение. Реставрация. М.: Индрик, 2015. — 286 с.

28. Шикалов В. С., Клинков С. В., Косарев В. Ф. Холодное газодинамическое напыление алюминиевого покрытия на эрозионно нестойкий материал // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. №5. С. 779–787.

29. De Force B., Eden T., Potter J. Cold spray Al-5% Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20. No. 6. P. 1352–1358.

30. Kurakov S., Kotelnikov P. Scientific Restoration of Polytechnic Heritage: The Case of the Franz Reuleaux Collection // Technology and Language. 2025. Vol. 6. No.3 (20). P. 64–79. — DOI 10.48417/technolang.2025.03.05.

31. Wang H.-R. et al. Effect of process conditions on microstructure and corrosion resistance of cold-sprayed Ti coatings / H.-R. Wang, B.-R. Hou, J. Wang, Q. Wang, W.-Y. Li // Journal of Thermal Spray Technology. 2008. Vol. 17. No. 5–6. P. 736–741.

1. III Профил`naya vy`stavka «PROrestavraciyu. Importozameshhenie v restavracionny`x materialax i texnologiyax» // Krugly`j stol ««Primenenie sovremenny`x texnologicheskix processov v nauchnoj restavracii» 30 noyabrya 2024 g. — URL: <https://yandex.ru/video/preview/8309309475587807700> (data obrashheniya: 24.12.2025).

2. IV Профил`naya vy`stavka «PROrestavraciyu. Importozameshhenie v restavracionny`x materialax i texnologiyax» // Nauchno-metodicheskij seminar «Sovremenny`e vozmozhnosti texnologij (naplavlenniya) v restavracii proizvedenij iz metalla» 05 dekabrya 2025 g. — URL: <https://prorestavraciyu.rf/25/day2#!/tab/1514283531-2> (data obrashheniya: 24.12.2025).

3. Alximov A. P. i dr. Osobennosti deformirovaniya mikrochasticz pri udare o tverduyu pregradu / A. P. Alximov, A. I. Gulidov, V. F. Kosarev, N. I. Nesterovich // Prikladnaya mexanika i texnicheskaya fizika. 2000. T. 41. №1 (239). S. 204–209.

4. Alximov A. P. i dr. Xolodnoe gazodinamicheskoe napy`lenie: Teoriya i praktika / A. P. Alximov, S. V. Klinkov, V. F. Kosarev, V. M. Fomin / pod red. V. M. Fomina. M.: Fizmatlit, 2010. — 536 s.

5. *Alximov A. P., Kosarev V. F., Papy`rin A. N.* Metod «xolodnogo» gazodinamicheskogo napy`leniya // *Doklady` Akademii nauk SSSR.* 1990. T. 315. S. 1062–1065.

6. *Alximov A. P., Kosarev V. F., Papy`rin A. N. i dr.* Novy`e materialy` i texnologii. Teoriya i praktika uprochneniya materialov v e`kstremal`ny`x processax. Novosibirsk: Nauka. Sib. izdat. firma, 1992. — 200 s.

7. *Alximov A. P., Kosarev V. F., Ploxov A. V.* Nauchny`e osnovy` texnologii xolodnogo gazodinamicheskogo napy`leniya (XGN) i svoystva napy`lenny`x materialov. Novosibirsk: NGTU, 2006. — 279 s.

8. *Bazanchuk G. A., Kurakov S. V., Kotel`nikov P. N.* Primenenie additivny`x texnologij v restavracii predmetov politexnicheskogo tipa s periodicheskim zubchaty`m profilom // *Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation.* 2024. №1. S. 7–28.

9. *Zajcev A. N., Aleksandrova Yu. P., Yagopol`skij A. G.* Obzor metodov ocenki prochnosti scepneniya gazotermicheskix pokry`tij // *Izv. vy`sshix ucheb. zavedenij. Mashinostroyeniye.* 2021. №5 (734). S. 48–59.

10. *Korobov Yu. S., Panov V. I., Razikov N. M.* Osnovny`e metody` i materialy` gazotermicheskogo napy`leniya. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2016. — 80 s. (Analiz svoystv gazotermicheskix pokry`tij: Ucheb. posobie: v 2 ch. Ch. 1).

11. *Kosarev V. F.* Fizicheskie osnovy` xolodnogo gazodinamicheskogo napy`leniya: special`nost` 01.02.05 «Mexanika zhidkosti, gaza i plazmy»: dis. ... d. f.-m. n. Novosibirsk: [B. i.], 2003. — 292 s.

12. *Kosarev V. F. i dr.* Svoystva medny`x i alyuminievy`x pokry`tij, poluchenny`x detonacionny`m i xolodny`m napy`leniem / V. F. Kosarev, A. A. Sova, S. B. Zlobin, V. Yu. Ul`yaniczkiy // *Uprochnyayushhie texnologii i pokry`tiya.* 2011. №6 (78). S. 20–26.

13. *Kosarev V. F., Klinkov S. V.* Kinetika formirovaniya XGN pokry`tij // XXIII seminar po strujny`m, otry`vny`m i nestacionarny`m techeniyam: sb. trudov (s mezhdunarodny`m uchastiem). Tomsk, 26–28 iyunya 2012 g.: Sb. trudov / pod red. G. V. Kuzneczova i dr. Tomsk: ITPU 2012. S. 210–213.

14. *Kotel`nikov P. N. i dr.* Issledovanie prichin razrusheniya lity`x latunny`x osvetitel`ny`x priborov, datiruemy`x konczom XIX – nachalom XX veka / P. N. Kotel`nikov, A. V. Mixajlova, M. V. Naczkiy, I. G. Ravich // *Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation.* 2025. №3 (15). S. 32–47.

15. *Kotel`nikov P. N., Kurakov S. V., Bogdanov A. V.* Nauchnaya restavraciya predmetov iz metalla s rel`efny`m izobrazheniem: sovremenny`e metody` vospolneniya utrat // *Nevskaya fotonika-2025. Vserossiyskaya nauch. konf. s mezhdunarod. uchastiem. Sb. nauch. trudov (13–18 oktyabrya 2025 g.)* SPb.: Un-t ITMO, 2025. S. 34.

16. Kruglyj stol «Theatrum Machinarum: Cifrovye kommemorativny`e praktiki» 27 noyabrya 2025 // XXV mezhdunarodnaya nauchno-teoreticheskaya konferenciya «Professional`naya kul`tura specialista budushhego». 27–29 noyabrya 2025, Sankt-Peterburgskij politexnicheskij universitet Petra Velikogo. — URL: <https://pcsf.spbstu.ru/> (data obrashheniya: 24.12.2025).

17. *Kurakov S. V. i dr.* Sovremenny`e podxody` i vozmozhnosti v nauchnoj restavracii chekanno-rel`efnogo profilya proizvedenij iz metalla / S. V. Kurakov, A. V. Bogdanov,

M. A. Mel'nikova, G. V. Tixomirov, P. N. Kotel'nikov // Dizajn. Materialy. Tekhnologiya. 2025. №4 (80). S. 22–30. DOI: 10.46418/1990-8997_2025_4(80)_22_30.

18. Lobanov M. L. i dr. Zashhitny'e pokry'tiya: Ucheb. posobie / M. L. Lobanov, N. I. Kar-donina, N. G. Rossina, A. S. Yurovskix. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo un-ta, 2014. — 200 s.

19. Mal'cev M. V. Metallografiya promy'shlenny'x czvetny'x metallov i splavov (S pril. Atlasa makro- i mikrostruktur). — 2-e izd., pererab. i dop. M.: Metallurgiya, 1970. — 368 s.

20. Naczkiy M. V., I. G. Ravich. Izuchenie prichin samoproizvol'nogo rastreskivaniya muzejny'x e'ksponatov, poluchenny'x obrabotkoj davleniem iz latunny'x listov // Kul'tur-ologicheskij zhurnal. 2021. №4 (46). S. 1–10.

21. Patent № 2353705 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK C23C 24/04, B05B 7/06. Sposob gazodinamicheskogo napy'leniya poroshkovy'x materialov i ustrojstvo dlya ego realizacii: № 2006141982/02: zayavl. 27.11.2006: opubl. 27.04.2009 / A. P. Alximov, V. F. Ko-sarev, S. V. Klinkov [i dr.]; zayavitel' Institut teoreticheskoy i prikladnoj mexaniki im. S. A. Xris-tianovicha SO RAN (ITPM SO RAN).

22. Patent № 2396371 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK C23C 24/04, B05B 7/10. Spos-ob gazodinamicheskogo napy'leniya poroshkovy'x materialov i ustrojstvo dlya ego real-izacii (Varianty): № 2008128115/02: zayavl. 09.07.2008: opubl. 10.08.2010 / A. P. Alximov, V. F. Kosarev, S. V. Klinkov [i dr.]; zayavitel' Institut teoreticheskoy i prikladnoj mexaniki im. S. A. Xristianovicha SO RAN (ITPM SO RAN).

23. Ravich I. G. O vozmozhnosti primeneniya otzhiga pri restavracii izdelij, poluch-enny'x iz listovoj latuni i podvergshixsya rastreskivaniyu // Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2022. №3. S. 35–44.

24. Ravich I. G. i dr. O vozmozhnosti otzhiga dlya snyatiya vnutrennix napryazhenij v izdeliyax s pozolotoj, izgotovlenny'x iz listovoj latuni s pomoshh'yu deformacii / I. G. Rav-ich, M. V. Naczkiy, A. V. Mixajlova, A. O. Bekker // Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2023. №3. S. 75–87.

25. Sova A. A. Issledovanie processa naneseniya mnogokomponentny'x pokry'tij metodom xolodnogo gazodinamicheskogo napy'leniya: special'nost' 01.02.05 «Mexani-ka zhidkosti, gaza i plazmy»: dis. ... k. t. n. Novosibirsk, 2009. — 120 s.

26. Fazlullin S. M. Problema izucheniya i soxraneniya predmetov muzejny'x kolekcij iz polimerny'x materialov. Chast' 1 // Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraci-ya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2025. №1 (13). S. 73–87.

27. Shemaxanskaya M. S. Metally i veshhi. Istoriya. Svoystva. Razrushenie. Restavraci-ya. M.: Indrik, 2015. — 286 s.

28. Shikalov V. S., Klinkov S. V., Kosarev V. F. Xolodnoe gazodinamicheskoe napy'lenie alyuminievogo pokry'tiya na e'rozionno nestojkij material // Teplofizika i ae'romexanika. 2019. T. 26. №5. S. 779–787.

Сведения об авторах

Котельников Павел Николаевич — художник-реставратор высшей категории произведений из металла; ФГБНИУ «ГОСНИИР», заведующий отделом научной реставрации произведений из металла
Россия, 107014, Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
E-mail: 113metal@gmail.com

Кураков Сергей Витальевич — инженер-исследователь; МГТУ им. Н. Э. Баумана, старший преподаватель кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» (МТ-4)
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1
E-mail: kurakov@bmstu.ru

Макарова Анастасия Сергеевна — кандидат культурологии, художник-реставратор I категории; ФГБНИУ «ГОСНИИР», ученый секретарь
Россия, 107014, Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
E-mail: aanpilogova@mail.ru

Самойлов Владимир Борисович — кандидат технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, доцент кафедры «Технологии обработки материалов» (МТ-13)
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1
E-mail: wladsam@mail.ru

Kotelnikov Pavel N. — restorer of the highest category of metal works; the State Research Institute for Restoration, Head of the Department of scientific restoration of metal works
44-1, Gastello St., Moscow, 107014, Russia
E-mail: 113metal@gmail.com

Kurakov Sergey V. — Researcher engineer; Bauman Moscow State Technical University, Senior Lecturer of the Department «Metrology and Interchangeability»
5-1, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russia
E-mail: kurakov@bmstu.ru

Makarova Anastasia S. — Ph.D. cult., restorer of the I cat.; the State Research Institute for Restoration, Academic Secretary
44-1, Gastello St., Moscow, 107014, Russia
E-mail: aanpilogova@mail.ru

Samoilov Vladimir B. — Ph.D.; Bauman Moscow State Technical University, Associate Professor of the Department «Materials Processing Technologies»
5-1, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russia
E-mail: wladsam@mail.ru

Научное издание

**Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.**

Свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ № ФС77-82901

от 14.03.2022 г.

ISSN 2782-5027

Подписано в печать 30.06.2026 г.

Федеральное государственное бюджетное
научно-исследовательское учреждение
«Государственный научно-исследовательский институт реставрации»
107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
e-mail: journal@gosniir.ru
Сайт: <http://www.journal-gosniir.ru/>